Spanning, stroom, weerstand

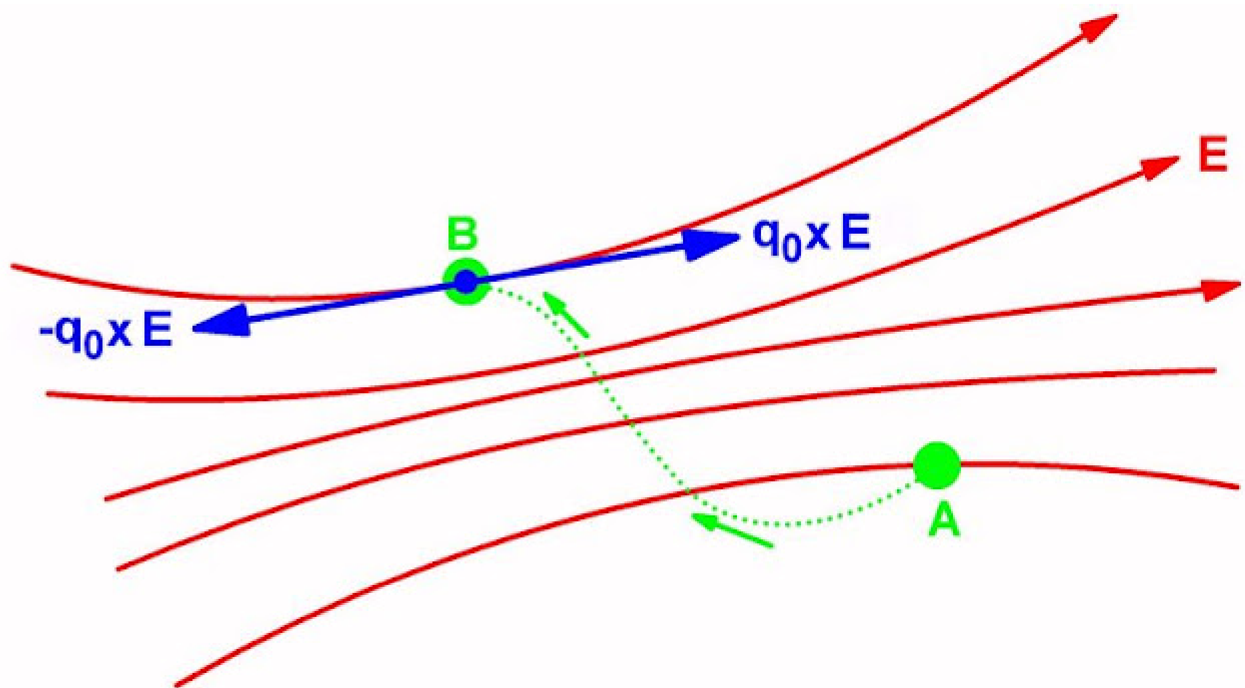
Het elektrisch potentiaal is een moeilijk begrip om zonder hogere wiskunde uit te leggen. In dit artikel wordt een poging gewaagd om dat toch te doen door het te vergelijken met een mechanisch equivalent. Nadien zetten wij de stap naar het potentiaalverschil oftewel elektrische spanning, wat ons uiteraard bij de volt brengt. Van de volt is het een kleine stap naar de ampère, de ohm, de watt en de wattseconde. Spanning, stroom, weerstand, vermogen en energie: alle basisgrootheden van de elektriciteit in één artikel verenigd!

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 07-10-2017

Wat is het elektrisch potentiaal?

Een mechanisch equivalent
Voor het begrijpen van het begrip elektrisch potentiaal moet u even terug grijpen naar de klassieke mechanica. Als u een kogel van de grond optilt en verplaatst naar een hoogte van één meter, dan moet u arbeid of energie verrichten. Die energie wordt als het ware opgeslagen in de kogel, want als u de kogel weer loslaat zal deze naar beneden vallen, waar uiteraard ook weer energie voor nodig is. De energie die in potentie in een kogel (of gelijk welk voorwerp) aanwezig is, noemt men potentiële energie. Het voorwerp is in staat energie te leveren, op het moment dat hiervoor de voorwaarden geschapen worden.

Elektrische potentiële energie
Vanwege de natuurkundige importantie van het begrip energie heeft men gezocht naar een mogelijkheid om dit begrip ook in de elektriciteitsleer in te voeren. De redenering wordt verklaard aan de hand van onderstaande figuur. Stel dat ergens in de ruimte een elektrisch veld aanwezig is, dat uiteraard gedefinieerd kan worden door de elektrische veldsterkte E. Stel nu dat in dit veld op punt A een elektrische lading q_0 wordt geplaatst. Deze lading zal een Coulomb-kracht ondervinden, die gegeven wordt door de uitdrukking:
$F = q_0 \cdot E$
Om de lading van punt A naar punt B te verplaatsen moet een tegengestelde kracht -F worden uitgeoefend op de lading. Volgens de algemene wetten van de mechanica kan de arbeid die hiervoor nodig is uitgedrukt worden door:
$W = -F \cdot s$
Hierin is s een vectorfunctie die de afstand beschrijft die wordt afgelegd door de lading. Als in de mechanica een hoeveelheid arbeid op een vallend lichaam wordt uitgeoefend, dus tegen de zwaartekracht in, stijgt de potentiële energie van het voorwerp met W. Iets dergelijks kunt u zich ook voorstellen als op een lading q_0 een hoeveelheid arbeid wordt uitgeoefend, tegen de veldkracht in. Die toename van de potentiële energie van de lading wordt het elektrisch potentiaal van de lading genoemd. Deze elektrische potentiële energie wordt voorgesteld door het symbool U en het energieverschil tussen de toestand in punt B en in punt A met ΔU.



Definitie van het begrip elektrisch potentiaal. (© 2017 Jos Verstraten)

Wat betekent de Griekse letter Δ (delta)?
Δ is een Griekse letter, die als delta wordt uitgesproken. In de wis- en natuurkunde gebruikt men Δ steeds voor het uitdrukken van kleine verschillen in de waarde van een en dezelfde grootheid.

Het elektrisch potentiaalverschil, de volt

Van potentiaal naar spanning
U kunt dit verschil in potentiële energie (in vereenvoudigde vorm zonder gebruik te maken van integraalrekening) uitdrukken door de formule:
$\Delta U = U_B - U_A = -[q_0 \bullet E \bullet s]$
Nu is men niet zo geïnteresseerd in de potentiële energie die nodig is om een bepaalde lading te verplaatsen in een elektrisch veld. Veel interessanter is het om de potentiële energie te weten die nodig is per eenheid van lading. Deze grootheid wordt uitgedrukt door het symbool V en wordt alleen bepaald door het eigenschap van het elektrisch veld. Arbeid en energie zijn scalaire grootheden, dus zonder vectoriële richting, zodat ook het elektrisch potentiaalverschil een zuiver scalaire eenheid is. Als eenheid werd de volt (V) gekozen, die overeen komt met newtonmeter per coulomb. Aangezien een Nm meestal wordt vervangen door een joule, kan de eenheid van elektrisch potentiaalverschil ook worden geschreven als J/C.

Definitie van de volt
Het voorgaande kan kort en krachtig worden samengevat. Als er een potentiaal verschil bestaat van 1 V tussen twee plaatsen in een elektrisch veld, dan kost het één joule aan energie om een lading van één coulomb van het ene naar het andere punt te verplaatsen. Maar omgekeerd kan natuurlijk ook gesteld worden dat 1 V de hoeveelheid energie voorstelt, die het heersende elektrisch veld moet verrichten om de eenheidslading van het andere naar het ene punt te verplaatsen. Beide definities zijn complementair, maar de tweede drukt uiteraard veel beter uit dat het begrip elektrisch potentiaal of elektrische spanning in wezen niets meer of minder is dan een indicatie voor een hoeveelheid verrichte energie.

Nieuwe definitie van elektrische veldsterkte
De elektrische veldsterkte E werd gedefinieerd als de evenredigheidsfactor tussen een lading Q en de kracht F die op de lading wordt uitgeoefend:

$F = E \cdot Q$
waaruit volgt:
$E = F / Q$
Als u een lading Q van A naar B wilt verplaatsen en tussen beide punten staat een potentiaal verschil van V, dan moet u daarvoor een arbeid verrichten van:
$W = Q \cdot V$
Die arbeid kan echter ook uitgedrukt worden als de noodzakelijke kracht F maal de verplaatsing s:
$W = F \cdot s$
Beide formules drukken dezelfde grootheid uit, dus:
$Q \cdot V = F \cdot s$
Hieruit volgt:
$F / Q = V / s$
De linker term van deze formule is gelijk aan de elektrische veldsterkte E. Deze is dus gelijk aan V gedeeld door s. Met andere woorden, u kunt de elektrische veldsterkte ook uitdrukken in de eenheid Volt per meter (V/m).

Elektrisch potentiaal ten opzichte van de aarde
Uit de definitie van het potentiaalverschil volgt duidelijk dat deze grootheid steeds een verschil uitdrukt tussen de potentialen op twee verschillende plaatsen in een elektrisch veld. Nu is dat een beetje een onhandige definitie. Vandaar dat men in de meeste gevallen aan een van de punten een energie van nul toekent. Het potentiaalverschil wordt dan herleid tot het potentiaal zonder meer. Dat is dan het potentiaal op één punt ten opzichte van een referentiepunt, waarvan het potentiaal op nul wordt gesteld. In wezen doet het er niet toe welk punt u als nulreferentie gebruikt.
In de theoretische elektriciteitsleer wordt meestal een punt in het oneindige genomen. In de praktijk van alledag werkt u echter steeds met het potentiaal van de aarde als nulreferentie. Deze kan als constant beschouwd worden, omdat bij elektrische metingen steeds direct of indirect met de invloed van de aarde rekening gehouden moet worden. Men spreekt dan van spanning ten opzichte van de aarde en het is deze grootheid die in de praktische elektriciteit en elektronica door het leven gaat als dé spanning.

Het begrip elektronvolt

Een andere grootheid voor hetzelfde fysische verschijnsel
Tot slot van dit artikel zij nog vermeld dat naast de volt ook de eenheid elektronvolt (eV) wordt gebruikt voor het uitdrukken van elektrische potentiële energie. Een energie van 1 eV wordt verricht als de lading van één elektron wordt verplaatst tegen een potentiaalverschil van 1 V. Omdat de lading van een elektron gelijk is aan $1{,}60218 \cdot 10^{-19}$ C, kunt u dus zonder meer stellen dat de energie van 1 eV gelijk is aan $1{,}60218 \cdot 10^{-19}$ J. Het begrip eV wordt niet vaak gebruikt in de elektronica, maar des te meer in de moderne natuurkunde. Als elektronen en protonen versneld worden in versnellers gaat hun energie stijgen. Dergelijke energieën worden steeds uitgedrukt in eV.

Wat is elektrische spanning?

Definitie
Een elektrische spanning is een hoeveelheid potentiële energie, die noodzakelijk is om elektrische ladingen te verplaatsen in een elektrisch veld. U zou het kunnen vergelijken met een roeier, die een bepaalde krachtsinspanning moet leveren om zijn bootje tegen de stroom in te verplaatsen. Hoe sterker de stroming (veld) en hoe zwaarder de boot (lading), hoe meer krachtsinspanning de roeier moet leveren.

Eenheid en symbool

De eenheid van elektrische spanning is, zoals algemeen bekend, de volt, afgekort tot V. Dit ter ere van de Italiaanse fysicus Allessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, die leefde van 1745 tot en met 1827. Volta staat bekend als de uitvinder van de elektrische batterij, een apparaat waarmee het mogelijk was continu, zonder moeilijke toestanden, een potentiaal verschil tussen twee geleiders te creëren.
De wiskundige definitie van de Volt wordt gegeven door:
1 V = 1 J / 1 C = [1 N • 1 m] / 1 C
In woorden: één volt is het potentiaal verschil dat een energie van één joule opwekt als een lading van één coulomb verplaatst wordt van de ene naar de andere geleider.
Het symbool voor spanning is helaas niet gestandaardiseerd. In schema's treft u zowel de letters U en E aan, waarmee in beide gevallen spanningen worden bedoeld. Toch is er principieel een groot verschil tussen U en E!

De elektromotorische kracht

Vaak leest u in artikelen die over elektronica gaan de afkorting 'emk' of 'tegen-emk'. Dit letterwoord is de afkorting van 'elektromotorische kracht', een begrip dat zeer nauw samenhangt met de definitie van elektrische spanning. De elektromotorische kracht die een bepaald onderdeel opwekt is niets anders dan de totale energie per coulomb, die door dit onderdeel in een bepaalde schakeling kan wordt gegenereerd.
Minder ingewikkeld gesteld is de emk de elektrische spanning die aan de klemmen van een onbelaste spanningsbron beschikbaar is. Dat de spanning van een bepaalde spanningsbron afhankelijk is van de belasting, wordt duidelijk als het begrip weerstand wordt gedefinieerd in een van de volgende artikelen. Hoe dan ook, het zal wel duidelijk zijn dat de emk eveneens in V wordt uitgedrukt. In theorie is het nu zo dat de emk van een spanningsbron moet worden voorgesteld door het symbool E, terwijl alle overige spanningen door de letter U worden aangegeven. Maar er zijn maar weinig mensen die zich aan deze afspraak houden.

Spanning bestaat alleen tussen twee punten

Uit de eerder beschreven definitie van elektrische spanning volgt dat dit verschijnsel alleen aanwezig kan zijn tussen twee punten. Toch zult u in artikelen over elektronische schema's vaak een tekst lezen als *'dit punt staat op een spanning van 12,5 V'*. In elektronische schakelingen worden spanningen altijd gemeten ten opzichte van een referentie-potentiaal, de massa. Het potentiaal op dit punt wordt per definitie vastgesteld op 0 V, zodat alle overige spanningen in het schema gemakkelijk naar dit potentiaal gerefereerd kunnen worden. Als u in een elektronisch apparaat spanningen gaat meten, moet u de zwarte aansluiting van uw meter altijd verbinden met de massa van de schakeling. In de meeste gevallen wordt deze aansluiting COM of GND genoemd.

Het opwekken van elektrische spanning

Er zijn verschillende systemen ontwikkeld voor het opwekken van elektrische spanningen:
- Generatie door mechanische wrijving.
- Generatie door inductie.
- Generatie door warmte.
- Generatie door chemische actie.
- Generatie door licht.
- Generatie door mechanische vervorming.

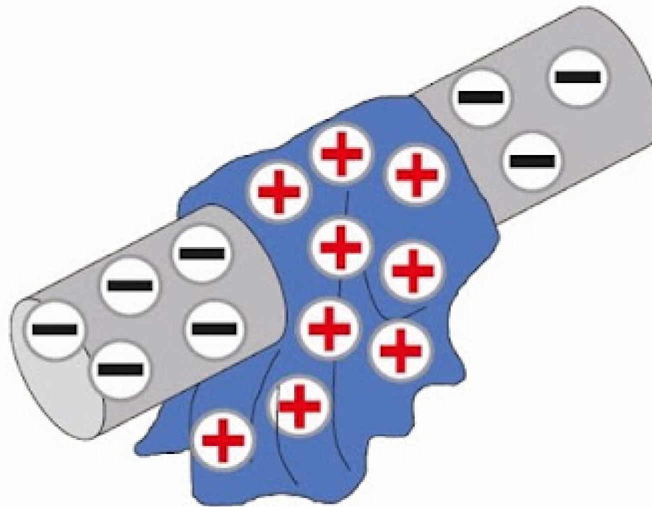
Al die vormen komt u wel op de een of andere manier in de praktische elektronica tegen.

Spanningsgeneratie door mechanische wrijving

De oudste vorm van spanningsgeneratie

Dit is uiteraard de van oudst bekende manier om een potentiaalverschil tussen twee punten te kweken. Reeds besproken apparaten zoals de Van de Graaf generator werken op deze manier. Als u twee geschikte materialen tegen elkaar wrijft kan het gebeuren dat er

elektronen van de ene stof naar de andere overspringen. Er ontstaat een ladingsverschil en dus ook een potentiaalverschil. In de meeste gevallen noemt men de op deze manier opgewekte spanning *'statische spanning'*.



Het ontstaan van statische spanning door mechanische wrijving. (© CoBouw)

Wrijft u met een wollen doek over een glazen staaf, dan zullen aan atomen gebonden elektronen uit het doek naar de glazen staaf migreren. In het doek blijven atomen achter met een tekort aan elektronen. Daardoor ontstaat een spanningsverschil tussen de staaf en het doek. Dat spanningsverschil kan zo groot worden, dat u duidelijk de knetterende vonkjes hoort die overspringen bij het wrijven. Nu kunt u in de plaats van glazen staaf en wollen doek een heleboel andere materialen en stoffen invullen, zoals schoenzool en vloerbedekking, broek en stoelzitting, trui en shirt. Zonder dat wij het weten zijn wij vaak een centrale van statische spanning. Ons lichaam wordt vaak opgeladen tot duizenden volt.

Gevaarlijk voor uw elektronische schakelingen
Generatie van statische spanningen zult u maar zelden nuttig gebruiken in de elektronica. Integendeel, het ontstaan van statische spanningen is iets waar u uw onderdelen en schakelingen op alle mogelijke manieren tegen moet beschermen. Zeker tegenwoordig, nu zeer ingewikkelde geïntegreerde schakelingen miljoenen transistoren bevatten, die ieder maar een paar duizendsten van een millimeter groot zijn, kunnen statische spanningen echte rampen aanrichten. Vandaar dat de meeste IC's tegenwoordig geleverd worden op stukjes geleidend schuimrubber, die er voor zorgen dat alle aansluitpennetjes op hetzelfde potentiaal staan.

Conductive foam
Dergelijk *'conductive foam'* heeft een specifieke weerstand van 10^5 Ω/cm, hetgeen laag genoeg is om statische spanningen kort te sluiten. Als u op de verpakking van elektronische onderdelen onderstaand symbooltje ziet weet u dat u zeer voorzichtig met het onderdeel moet omgaan en in ieder geval statische spanningen moet voorkomen.



Het symbooltje, waarmee wordt aangegeven dat een elektronisch onderdeel zeer gevoelig is voor statische spanningen. (© AliExpress)

Aardingsarmband gebruiken!
Zo'n onderdeel kan al beschadigd raken als u de behuizing met de ene hand vastpakt en met de andere hand een pennetje aanraakt. Om dergelijke rampen te voorkomen bestaat er een aantal eenvoudige en goedkope hulpmiddelen. Die hulpmiddelen hebben allemaal een simpel principe: zorg ervoor dat alles in de buurt van het onderdeel op een gelijk potentiaal staat. Dan zijn er geen potentiaalverschillen en kan er dus ook geen sprake zijn van statische spanningen. In onderstaande figuur wordt een van de eenvoudigste middeltjes voorgesteld in de strijd tegen statische spanningen: een aardingsarmband.



Een aardingsarmband is een goedkoop middel om elektronische onderdelen te beschermen tegen statische spanningen. (© AliExpress)

De armband bestaat uit een geleidend materiaal en wordt met een kabeltje met krokodilklem geleverd. Deze klem wordt verbonden met een mat van geleidend rubber die op uw laboratoriumtafel ligt. Het geheel wordt dan nog eens verbonden met de aarding van de aanwezige meetapparatuur.

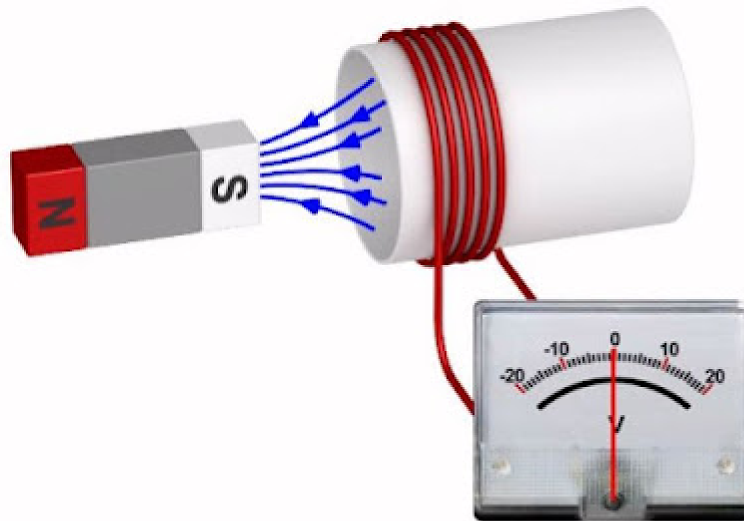


Een statische mat zorgt voor een veilige werkplek voor uw gevoelige componenten. (© AliExpress)

Spanningsgeneratie door inductie

Magnetisme wekt elektrische spanning op
Het principe van het opwekken van spanning door middel van inductie is getekend in onderstaande figuur. Als u een staafmagneet in en uit een spoel beweegt zal er in de spoel

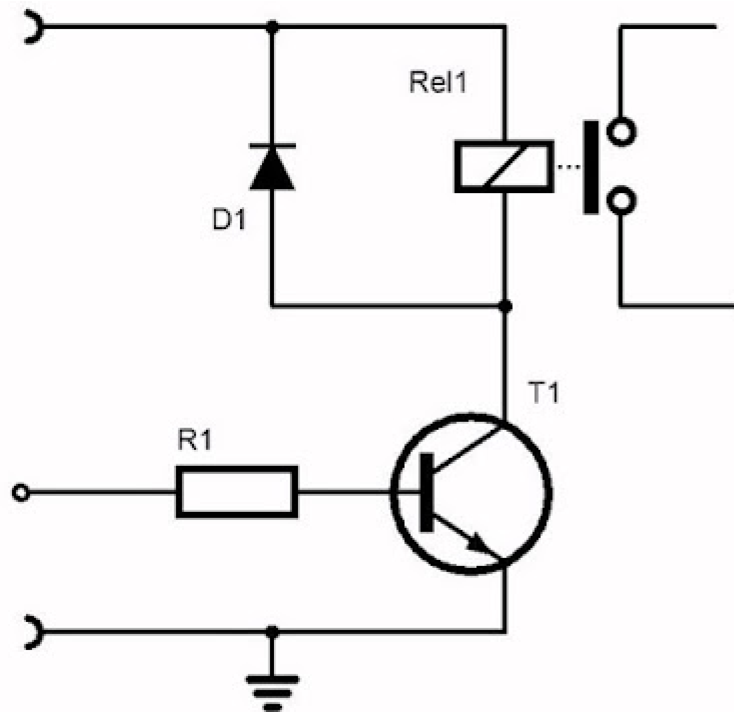
een spanning ontstaan. Meer algemeen gesteld: er ontstaat steeds een inductiespanning als een geleidende draad in een variërend magnetisch veld wordt aangebracht. In het voorbeeld ontstaat dat variërend veld door de verplaatsing van de magneet naar en van de spoel. Een bekend gegeven dat bijvoorbeeld op iedere fiets gebruikt wordt in de dynamo om de spanning te genereren voor het voeden van de lampjes. Maar ook de allergrootste elektrische centrales werken volgens dit principe. In de elektronica krijgt u vaak met inductie te maken. Bekende onderdelen die volgens dit principe werken of er op de een of andere manier gebruik van maken zijn de transformator, het gekoppeld LC-filter, de microfoon en het aloude magneto-dynamische element van de al even stokoude platendraaier.



Het genereren van elektrische spanning door inductie. (© nationalmaglab.org)

Tegen-emk

Maar er is nog een ander verschijnsel, waar de elektronicus vaak mee te maken heeft en dat op inductie stoelt: de tegen-emk van een spoel. Als u een relaisspoel bekrachtigt door er een stroom doorheen te sturen, zal deze stroom rond de spoel een magnetisch veld opbouwen. Stel nu dat u de stroom opeens tot nul reduceert. Op dat moment is het magnetisch veld nog aanwezig. Maar omdat de oorzaak van dit veld, de stroom, is weggevallen, zal ook het veld verdwijnen. Op dat moment bevindt de spoel van het relais zich in een variërend magnetisch veld, met als gevolg dat er in de spoel een inductiespanning wordt opgewekt. Deze inductiespanning kan vele malen groter zijn dan de voedingsspanning van de elektronische schakeling. Het gevaar bestaat dat sommige onderdelen niet tegen deze inductiespanning bestand zijn en doorslaan. Deze inductiespanning noemt men de 'tegen elektromotorische kracht' van het relais, een mondvol dat meestal wordt afgekort tot 'tegen-emk' of zelfs 'temk'. Het is absoluut noodzakelijk maatregelen te treffen die de nare gevolgen van deze temk moeten verhinderen. Dat kan gelukkig heel eenvoudig door over de spoel van het relais een diode te schakelen. Hoe dat moet is getekend in onderstaande figuur.



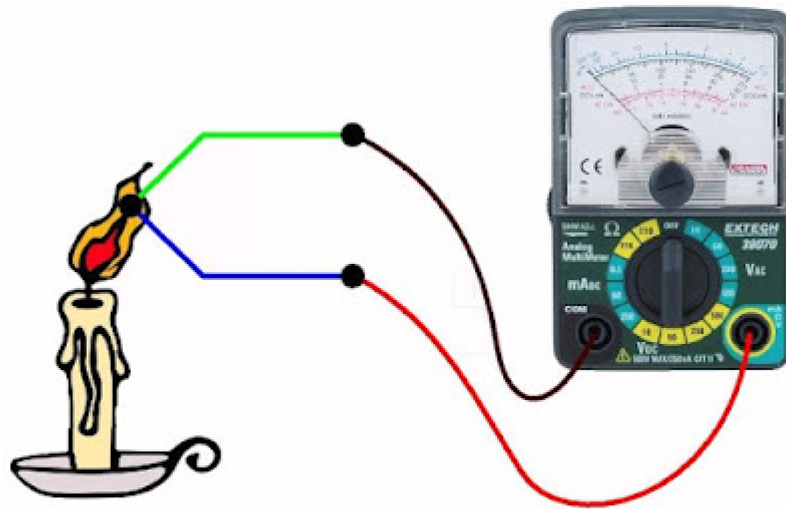
Het beveiligen van een transistor tegen de inductiespanning die in de spoel van een relais wordt opgewekt. (© 2017 Jos Verstraten)

De diode staat natuurlijk zo geschakeld, dat deze spert voor de normale stroomrichting in de schakeling. De temk wekt een spanning op die de tegengestelde polariteit heeft dan de voedingsspanning. De aansluiting van de relaisspoel die met de collector van de transistor verbonden is wordt dus positief ten opzichte van de voedingsaansluiting. De diode gaat dan geleiden en sluit de temk op een zeer effectieve manier kort.

Spanningsgeneratie door warmte

Het Seebach-effect

Natuurlijk kunt u stellen dat in iedere elektrische centrale spanning wordt opgewekt door warmte. Maar dit is een indirect proces, waar de warmte eerst stoom vol thermische energie stopt, die nadien een turbine aan het draaien zet. Bedoeld worden processen, waarbij warmte rechtstreeks in spanning wordt omgezet. Het principe is getekend in onderstaande figuur. Als u twee draden, gemaakt van verschillend metaal, in elkaar draait en deze verbinding flink opwarmt, zult u opmerken dat er tussen beide draden een meetbare spanning ontstaat. Door het verschillend aantal vrije elektronen in de buitenste elektronenschillen ontstaat een potentiaal verschil op de plaats waar de twee metalen star aan elkaar bevestigd zijn. Dit potentiaal verschil uit onder de vorm van een zeer kleine spanning, die tussen de twee draden gemeten kan worden. Dit verschijnsel is in de fysica bekend onder de naam Seebeck-effect.



Het genereren van een elektrische spanning door middel van warmte. (© 2017 Jos Verstraten)

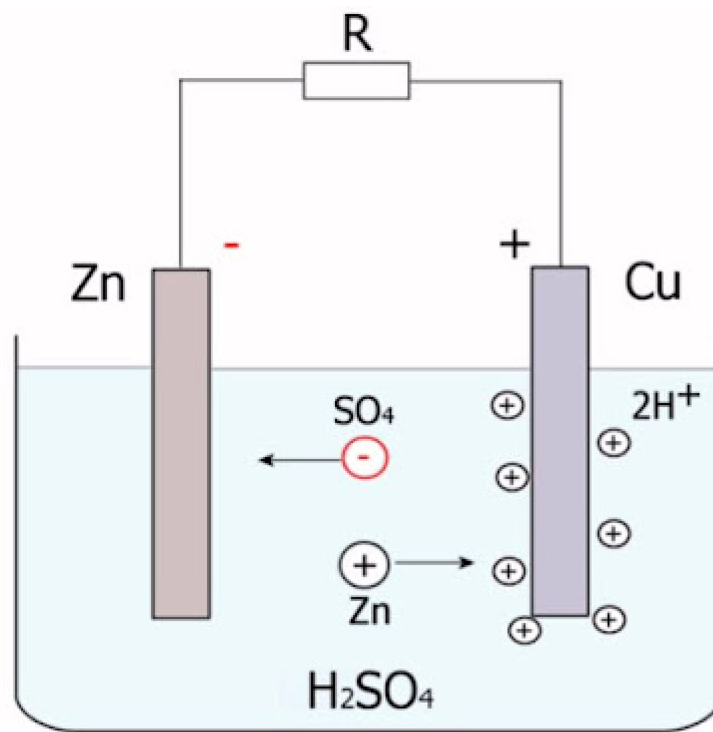
Thermokoppels
De opgewekte spanning is zeer klein, vaak niet meer dan enige tientallen mV, maar goed meetbaar. Een van de bekendste toepassingen van dit verschijnsel zijn de *'thermokoppels'*, onderdelen die gebruikt worden voor het meten van zeer hoge of zeer lage temperaturen. De normaal gebruikte halfgeleider thermo-sensoren laten het boven 150 °C gegarandeerd afweten en dan is een thermokoppel in feite de enige manier om op een goedkope manier een temperatuur te meten.

Ongewenste thermokoppels
Maar aan dit op zich zeer nuttige verschijnsel is een vervelend neveneffect verbonden. Als u een koperen draadje vastschroeft in een printkroonsteentje, waarvan het metalen deel uit vertind messing bestaat, dat ontstaat er dus ook een thermokoppel. Bij sommige zeer gevoelige schakelingen, die zeer kleine gelijkspanningen moeten versterken, kan dit problemen veroorzaken. Een ander onverwacht neveneffect kan ontstaan bij het monteren van elektronische schakelingen in behuizingen. Als u een kast uit aluminium maakt en de onderdelen van deze kast met messing boutjes en moertjes in elkaar schroeft, dan vormt iedere messing/aluminium-overgang in wezen een thermokoppeltje, dat zichzelf bovendien kortsluit. De kleine spanningen die als gevolg hiervan ontstaan kunnen in vochtige omgevingen tot corrosie van aluminium en/of messing leiden! Bij professionele behuizingen zult u opmerken dat men de contactoppervlakken tussen twee metalen isoleert door er een teflon of nylon ringetje tussen te monteren.

Spanningsgeneratie door chemische actie

Het galvanisch principe
Natuurlijk ook al een bekend gegeven, want iedere batterij of accu maakt er gebruik van. Het principe is getekend in onderstaande figuur en berust op het galvanisch principe. Genoemd naar Luigi Galvani (9 september 1737 geboren, 4 december 1798 overleden). Twee verschillende metalen, gedompeld in een elektrisch geleidende oplossing, genereren een kleine spanning. Bij een batterij worden via een chemische reactie aan de minpool elektronen vrijgemaakt, terwijl aan de pluspool op hetzelfde moment via een andere chemische reactie elektronen worden gebonden. Via een op de batterij aangesloten component (bijvoorbeeld een lampje) kunnen nu de elektronen vanaf de minpool, door het lampje, naar de pluspool stromen. In de elektronica treft u vooral zink/koolstof-, lood/zuur-, nikkel/cadmium- en lithium/mangaanoxide-cellen aan. NiCad's worden nog vaak gebruikt als bufferbatterij om bepaalde delen van een elektronische schakeling van spanning te voorzien, ook als de hoofdvoeding is uitgeschakeld. Dat geldt voor geheugens, waar belangrijke gegevens in opgeborgen zitten, maar bijvoorbeeld ook voor het tijd/datum-IC dat tegenwoordig in iedere

computer aanwezig is en de juiste datum en tijd levert.



Het principe van spanningsopwekking door middel van een chemische actie. (© 2017 Jos Verstraten)

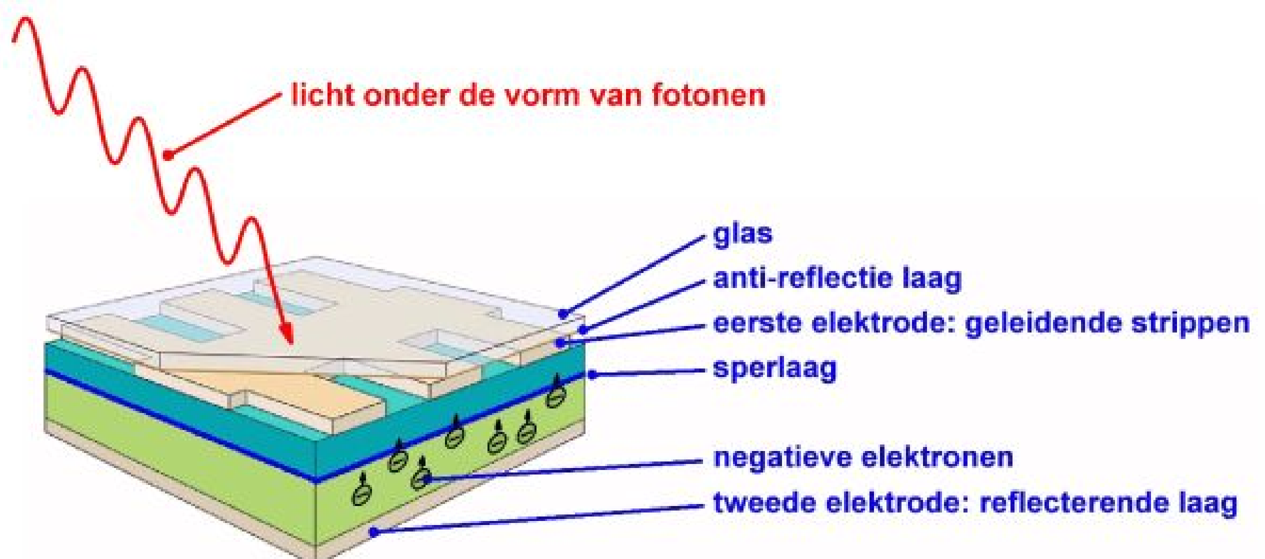
De Weston-cel
Een andere toepassing van het galvanisch principe treft men aan in de zogenoemde normaal-cel of Weston-cel. Zoals getekend in onderstaande figuur bestaat dit galvanisch element uit twee kolommen. De positieve elektrode bestaat uit zuiver kwik (Hg), de tweede uit een legering van kwik en cadmium. Beide elektroden worden bedekt met een pasta-achtige substantie, die enerzijds bestaat uit kwiksulfaat Hg_2S0_4 en anderzijds uit cadmiumsulfaat $CdS0_4$. De constructie wordt gevuld met een verzadigde oplossing van cadmiumsulfaat. Bij 20 °C geeft deze cel een spanning af van precies 1,01835 V. Dergelijke cellen worden nog vaak toegepast om meetapparatuur, zoals digitale voltmeters met een hoge resolutie, te ijken. Wel mag de cel met niet meer dan 10 nA belast worden.



De Weston-cel wordt gebruikt als spanningsreferentie.
(© DrKFS.net)

Spanningsgeneratie door licht

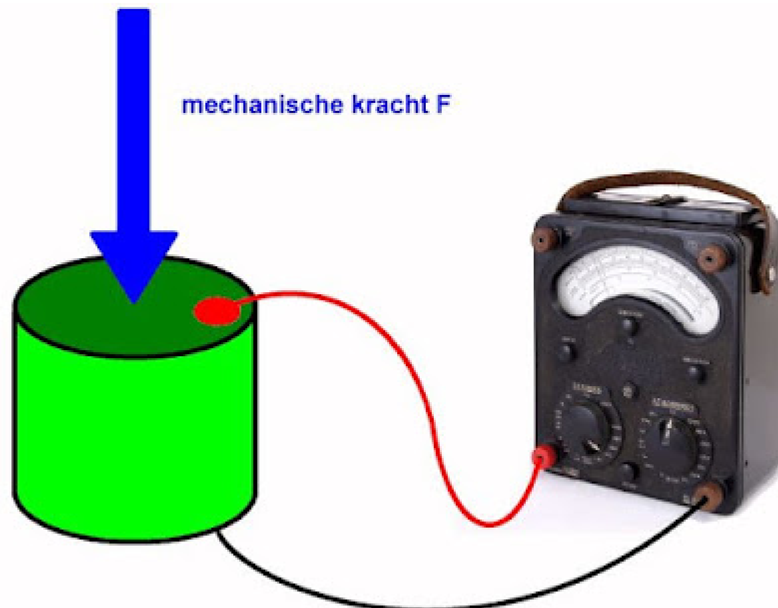
Het principe van het zonnepaneel
Ook dat is een principe dat in de moderne elektronica vaak gebruikt wordt. Denk maar aan zonnecellen, waarmee het op dit moment mogelijk is rendabele spanningsvoorziening voor woonwijken, boten, caravans en zomerhuisjes mogelijk te maken. De werking van dergelijke cellen is vrij complex en wordt verklaard door het foto-elektrisch verschijnsel. Het komt er op neer dat het invallend licht weer elektronen uit atomen bevrijd, die vanwege hun snelheid door een sperlaag dringen. Op deze manier ontstaat een potentiaal verschil over de cel, hetgeen zich uiteraard uit onder de vorm van een spanning.



Het genereren van elektrische spanning in een zonnecel. (© 2017 Jos Verstraten)

Spanningsgeneratie door mechanische vervorming

Het piëzo-elektrisch effect
Als u bepaalde kristallen tussen twee geleidende plaatjes monteert en nadien een mechanische druk op het kristal uitoefent, zult u vaststellen dat er tussen de twee geleidende plaatjes een spanning ontstaat. Dit verschijnsel staat bekend als het piëzo-elektrisch effect, een woord dat is afgeleid van het oud-Griekse woord piezein, hetgeen drukken betekent. Deze manier van spanningsgeneratie wordt in de elektronica gebruikt bij kristalmicrofoons en bij sommige druksensoren.

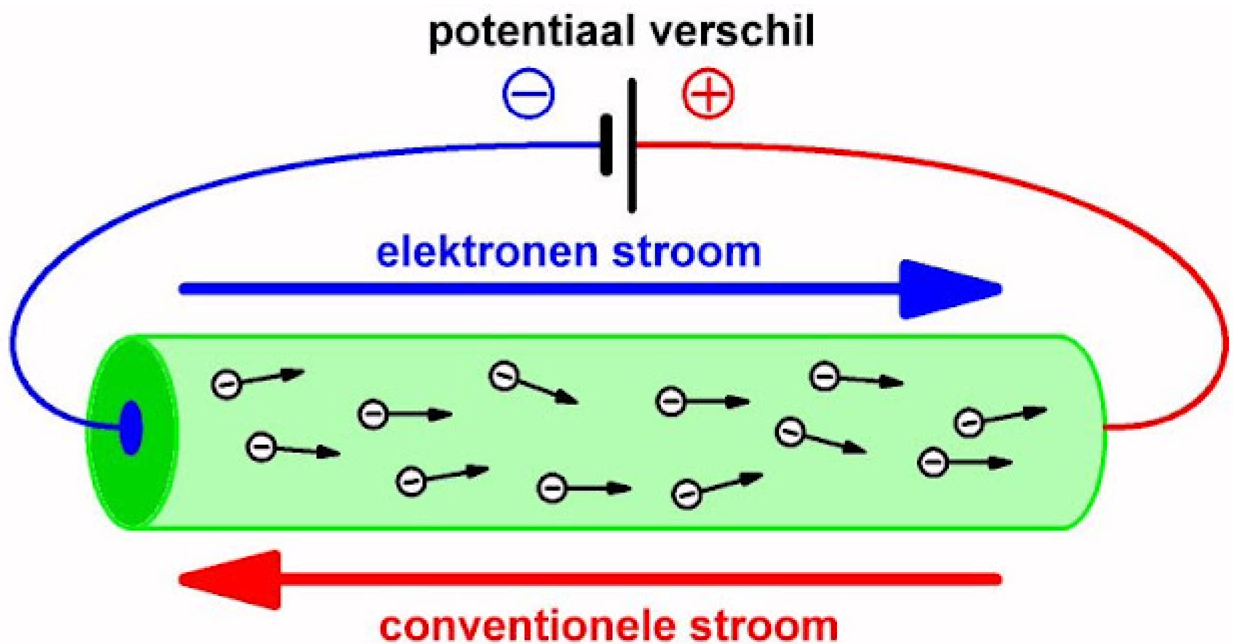


Genereren van een spanning met behulp van het piëzo-elektrische effect. (© 2017 Jos Verstraten)

De elektrische stroom

Definitie
Een elektrische stroom ontstaat als vrije elektronen zich, gemiddeld genomen, allemaal in een en dezelfde richting door een geleider bewegen. Dat kan alleen maar gebeuren als tussen de twee uiteinden van die geleider een potentiaal verschil aanwezig is. Het elektrisch veld dat hiervan het gevolg is, zal ervoor zorgen dat de vrije elektronen een kracht in een bepaalde richting ondervinden, waardoor de beweging op gang komt.

Belangrijke conclusie
Uit deze definitie blijkt dat stroom altijd een gevolg is van de aanwezigheid van een spanning. Zonder spanning geen stroom, maar wel spanning zonder stroom.



Het ontstaan van een elektrische stroom in een geleider. (© 2017 Jos Verstraten)

De richting van de elektrische stroom
Met de richting van de stroom is iets raars aan de hand. Zoals u waarschijnlijk wel weet, stelt men dat de elektrische stroom van de positieve pool van een spanningsbron via de belasting afvloeit naar de negatieve pool. Toch is dit in strijd met de theorie. Elektronen vloeien immers steeds van een punt waar er te veel elektronen zijn naar een punt waar er te weinig zijn. Met andere woorden, elektronen vloeien steeds van een punt met een bepaald potentiaal naar een ander punt dat in ieder geval een positiever potentiaal heeft. De richting van de stroom, zoals deze steeds wordt gebruikt om de werking van een elektronische schakeling te doorgronden, is dus tegengesteld aan de richting van de elektronen. Deze tegenstelling heeft historische gronden en is nooit rechtgezet. Het vreemde is nu dat het zeer gemakkelijk is om bijvoorbeeld de werking van een transistor te verklaren als u uitgaat van de (onrealistische) stroomrichting van plus naar min, maar het heel moeilijk is om de werking van diezelfde transistor te verklaren als u uitgaat van de reële elektronenstroom. Omdat het voor sommige toepassingen toch noodzakelijk is duidelijk te definiëren welke stroom wordt bedoeld heeft men de twee begrippen 'elektronenstroom' en 'conventionele stroom' ingevoerd. Bij het verklaren van de werking van een elektronische schakeling gebruikt men steeds de conventionele stroom, die dan gewoonweg stroom wordt genoemd.

Eenheid en symbool
De eenheid van elektrische stroom is de ampère, genoemd naar de Franse wis- en natuurkundige André Marie Ampère, afgekort tot A. Eén ampère is de sterkte van een constante elektrische stroom die vloeit als er gedurende één seconde een elektrische lading van één coulomb langs een bepaald punt in een geleider wordt verplaatst:
$I = Q / t$
Het algemeen gebruikelijke symbool voor elektrische stroom is I.

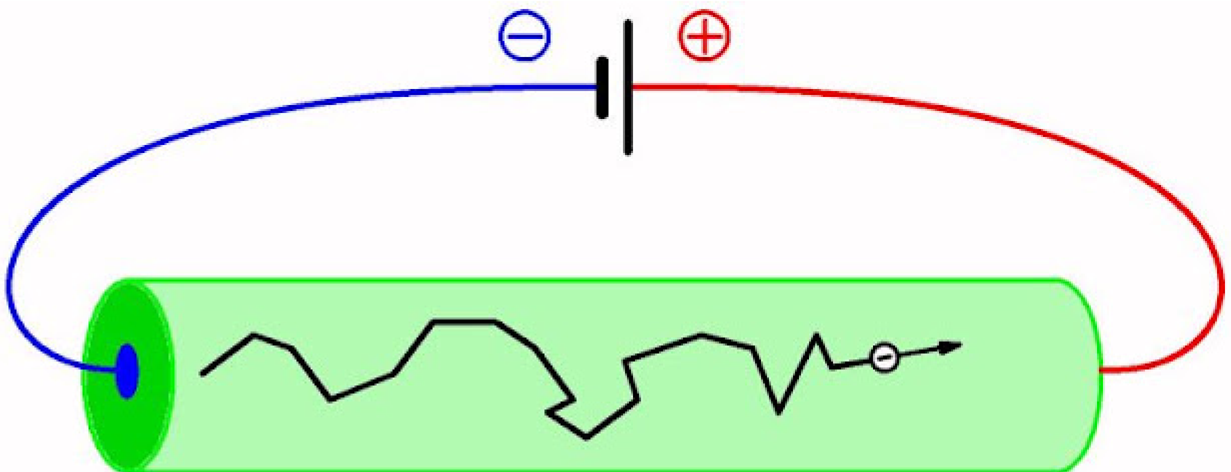
De stroomdichtheid
De definitie van de ampère doet geen uitspraak over het oppervlak, waardoor de lading vloeit. Een stroom van 1 A ontstaat zowel als een lading van 1 Q zich gedurende 1 s door een flinterdun draadje perst als door een boomstam dikke geleider. Nu zal het duidelijk zijn dat de ene stroom toch iets andere effecten heeft dan de tweede. Vandaar dat men een nieuwe grootheid heeft bedacht, de stroomdichtheid s. De stroomdichtheid geeft aan hoeveel ampère stroom er door een bepaald oppervlak A van een geleider vloeit. In de meeste gevallen werkt men met een standaard oppervlak van 1 mm^2, zodat deze stroomdichtheid wiskundig gedefinieerd kan worden als:
$s = I / A$
De stroomdichtheid wordt bijgevolg uitgedrukt in A/mm^2. De toelaatbare stroomdichtheid voor

koperen geïsoleerde geleiders bedraagt bij een omgevingstemperatuur van 25 °C ongeveer 16 A/mm^2. Wordt de stroomdichtheid groter, dan zal de geleider te warm worden, waardoor de eigenschappen van de isolatie kunnen degenereren en de geleider onbetrouwbaar wordt.

Even terug naar de volt
In een ander artikel in deze serie werden de vijf fundamentele grootheden lengte, massa, tijd, stroom en temperatuur besproken en werd gesteld dat alle overige grootheden in principe tot deze vijf grootheden te herleiden zijn. Hoe zit dit nu met de elektrische spanning? Aan de hand van de tot nu toe vergaarde wiskundige kennis kunt u op een eenvoudige manier aantonen dat de spanning inderdaad is te herleiden tot de fundamentele grootheden.
Een potentiaal verschil van één volt komt overeen met een arbeid van één joule, die wordt geleverd om een lading van één coulomb te verplaatsen:
V = J / Q
Maar één joule is gelijk aan één newtonmeter en één coulomb is gelijk aan een stroom van één ampère, die gedurende één seconde vloeit:
V = [N • m] / [A • s]
Eén newton is echter weer gelijk aan de kracht die een massa van één kilogram een versnelling geeft van één meter per seconde kwadraat:
V = [kg • m/s^2 • m] / [A • s]
Natuurlijk kunt u meter maal meter vervangen door meter in het kwadraat en seconde maal seconde in het kwadraat door seconde tot de derde macht:
V = [kg • m^2] / [A • s^3]
Hiermee hebt u de eenheid van elektrische spanning, de volt, volledig uitgedrukt in de fundamentele grootheden massa, lengte, stroomsterkte en tijd.

De elektrische weerstand

Niets gaat zonder wrijving
De elektronen die door een geleider vloeien, bewegen zich alles behalve volgens rechte banen. De energierijke elektronen botsen op hun tocht immers voortdurend tegen miljarden atomen, waardoor zij worden teruggekaatst of afgebogen en in feite een tamelijk zigzaggende baan volgen, zie onderstaande figuur. De vrije elektronen worden dus in hun beweging gehinderd, het is net alsof het materiaal van de geleider weerstand biedt tegen het vloeien van de elektronenstroom. De mate van weerstand hangt af van de eigenschappen van de geleider en van de temperatuur. Een geleider, die gemaakt is van zuiver koper zal bijvoorbeeld minder weerstand bieden tegen de stroom dan een geleider die gemaakt is van verontreinigd koper. Het lijkt dus alsof ieder materiaal de elektrische stroom op een eigen, specifieke manier zal geleiden.



De tamelijk willekeurige baan van een elektron door een geleider verklaart het ontstaan van weerstand.
(© 2017 Jos Verstraten)

Georg Simon Ohm
Het verschijnsel van elektrische weerstand is uitvoerig onderzocht door de Duitse natuurkundige Georg Simon Ohm. In 1826 ontdekte hij proefondervindelijk een verband tussen de stroomdichtheid s door een geleider en de elektrische veldsterkte F over de geleider. Dat verband was lineair, zodat Ohm een heel eenvoudige wet kon opstellen:
$s = \sigma \cdot F$
De evenredigheidsfactor σ tussen stroomdichtheid en veldsterkte wordt het specifieke geleidingsvermogen van de geleider genoemd. σ is een Griekse letter, die wordt uitgesproken als 'sigma'. Dit is een zeer belangrijke wet uit de elektriciteitsleer, die de algemene wet van Ohm wordt genoemd. Toch zullen maar weinig elektronici de beroemde wet van Ohm in deze formule herkennen!

De praktische wet van Ohm
Het was Ohm's grote verdienste dat hij gezocht heeft naar een mogelijkheid om het specifieke geleidingsvermogen van stoffen uit te drukken in de dagelijkse eenheden ampère en volt. Dat gaat eigenlijk heel gemakkelijk:
De veldsterkte F kunt u uitdrukken als spanning per meter, dus U / s.
De stroomdichtheid s kunt u uitdrukken als stroom per oppervlak, dus I / A. Als u nu die twee formules invult in de algemene wet van Ohm ontstaat:
$I / A = \sigma \cdot [U / s]$
of:
$U / I = s / [A \cdot \sigma]$
De term s / [A • σ] geeft dus de verhouding tussen de spanning over en de stroom door een geleider. Ohm voerde hiervoor een nieuwe eenheid in, de elektrische weerstand, voorgesteld door het symbool R. De eenheid van deze nieuwe grootheid werd de Ohm oftewel de Ω. De formule kan dus vereenvoudigd worden tot:
$U / I = R$
Dit is de algemeen bekende vorm van de wet van Ohm, een formule die ongetwijfeld net zo beroemd en bekend is als Einstein's:
$E = m \cdot c^2$

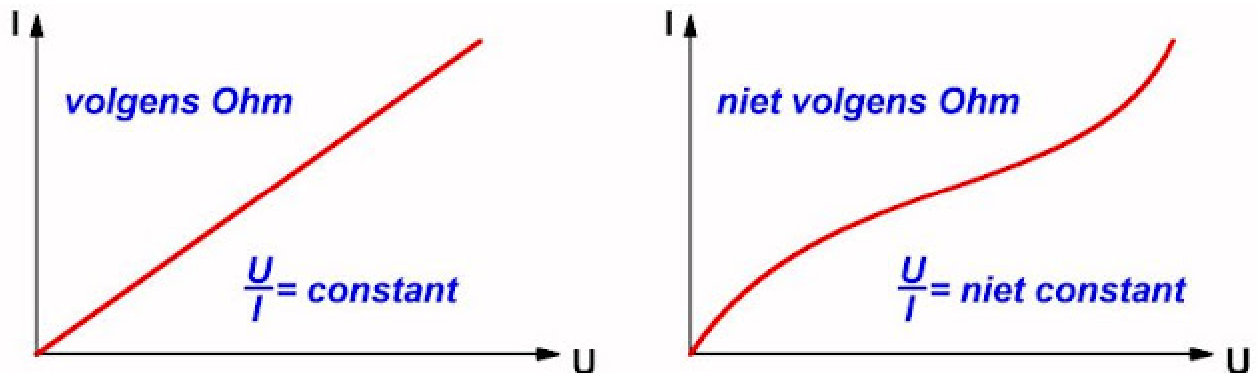
De betekenis van de wet van Ohm
De wet van Ohm geeft u een zeer eenvoudige methode om stromen te berekenen, als de spanningen en de weerstanden bekend zijn. Omgekeerd kunt u op dezelfde eenvoudige manier spanningen berekenen als de stromen en de weerstanden bekend zijn. De wet van Ohm is echter geen fundamentele wet der natuur, maar een zogenoemde 'empirische wet'. Een wet die is opgesteld naar aanleiding van talloze experimenten, die steeds tot hetzelfde resultaat aanleiding gaven. De wet van Ohm is echter niet universeel geldig! Uit de formules blijkt dat de weerstand R afhankelijk is van:
- De lengte s van een geleider.
- De doorsnede A van de geleider.
- De specifieke eigenschappen van de geleider, uitgedrukt door de grootheid σ.

Ohm experimenteerde alleen met geleiders waarbij σ een constante waarde heeft. Men heeft later ontdekt dat er heel veel stoffen bestaan (halfgeleiders!) waarbij dit niet het geval is. Bovendien zetten materialen uit door warmte, zodat ook de lengte s en de doorsnede A niet per definitie constant zijn. Bovendien heeft men later allerlei ingewikkelde fysische processen ontdekt, die de universele geldigheid van de wet van Ohm nog meer afzwakken. Dat geldt bijvoorbeeld als gewerkt wordt met heel grote stromen en erg hoge spanningen of voor ontladingen door gassen.

De wet van Ohm in de dagelijkse praktijk
Hoe dan ook, voor de dagelijkse praktijk in het elektronica-lab voldoet de wet van Ohm echter uitstekend. De grootheid R kunt u dan constant veronderstellen, zodat het lineaire en gemakkelijk te berekenen verband tussen stroom en spanning een uitstekend benadering van de realiteit is.

Grafische interpretatie van de wet van Ohm

Uit de formule van de wet van Ohm volgt dat het verband tussen stroom en spanning alleen gegeven wordt door R, een factor die binnen bepaalde grenzen constant kan worden beschouwd. U kunt dus een grafiekje maken dat de relatie legt tussen de spanning over een geleider en de stroom door de geleider. Als die grafiek kaarsrecht is, zie de linker grafiek in onderstaande figuur, dan kunt u besluiten dat u te maken hebt met een 'Ohm's materiaal'. Is dit verband niet kaarsrecht, zoals getekend in de rechter grafiek, dan is de factor R dus niet constant en hebt u te maken met een 'niet-Ohm's materiaal'.



Het verband tussen spanning en stroom voor materialen die voldoen aan de wet van Ohm (links)
en materialen die niet aan deze wet voldoen (rechts). (© 2017 Jos Verstraten)

De specifieke weerstand ρ
Naast de door Ohm gedefinieerde specifieke geleiding van geleidende materialen kunt u nog een tweede resistieve grootheid aan deze materialen toekennen: de specifieke weerstand. Als u namelijk draden maakt uit verschillende metalen, die echter allemaal even dik en even lang zijn, stelt u vast dat de weerstand van die draden verschilt. Dat gegeven is verwerkt in de grootheid 'specifieke weerstand'. Deze grootheid wordt gedefinieerd als de weerstand van een draad, gemaakt uit het beschouwde materiaal, die één meter lang is en één vierkante millimeter doorsnede heeft en dit bij een temperatuur van 20 °C. De specifieke weerstand wordt voorgesteld door de Griekse letter rho, geschreven als ρ en wordt uitgedrukt als:
$\rho = xxxx\ \Omega \cdot mm^2/m$
De specifieke weerstanden van enige veel gebruikte geleiders:
- Zilver: 0,016 $\Omega \cdot mm^2/m$
- Koper: 0,0178 $\Omega \cdot mm^2/m$
- Aluminium: 0,027 $\Omega \cdot mm^2/m$
- IJzer : 0,10 $\Omega \cdot mm^2/m$
- Constantaan: 0,50 $\Omega \cdot mm^2/m$
- Koolstof: 30 $\Omega \cdot mm^2/m$

De temperatuurscoëfficiënt α
Reeds eerder werd opgemerkt dat de weerstand van een geleider ook van de temperatuur afhankelijk is. Deze afhankelijk wordt vertaald naar de grootheid 'temperatuurscoëfficiënt', die wordt uitgedrukt door de Griekse letter α, die wordt uitgesproken als 'alfa'. U kunt een eenvoudig wiskundig verband opstellen tussen de weerstand van een geleider bij 0 °C en deze bij een willekeurige temperatuur, als u de waarde van α kent:
$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$
Hierin is:
- R_0: de weerstand van de geleider bij 0 °C
- R_t: de weerstand van de geleider bij een temperatuur van t °C
- α : de temperatuurscoëfficiënt van het materiaal

Uit de formule volgt dat α een getal is met als eenheid 1/°C. De temperatuurscoëfficiënt kan zowel positief als negatief zijn. Een positieve waarde betekent dat de weerstand van het materiaal toeneemt als de temperatuur stijgt, een negatieve waarde betekent dat de weerstand daalt als de temperatuur stijgt. Er zijn ook een paar stoffen bekend die een temperatuurscoëfficiënt van precies 0,0000/°C hebben. Dat betekent dat de weerstand van

die stoffen niet afhankelijk is van de temperatuur, hetgeen iedere elektronicus natuurlijk als muziek in de oren zal klinken. Een dergelijke stof is bijvoorbeeld constantaan, hetgeen de naam natuurlijk reeds doet vermoeden.
De temperatuurscoëfficiënt van vaak in de elektronica toegepaste stoffen:

- Aluminium: 0,0039/°C
- Constantaan: 0,0000/°C
- Koolstof: -0,0003/°C;
- Koper : 0,0040/°C;
- IJzer: 0,0045/°C;
- Zilver: 0,0036/°C.

Het elektrisch vermogen

De definitie van vermogen

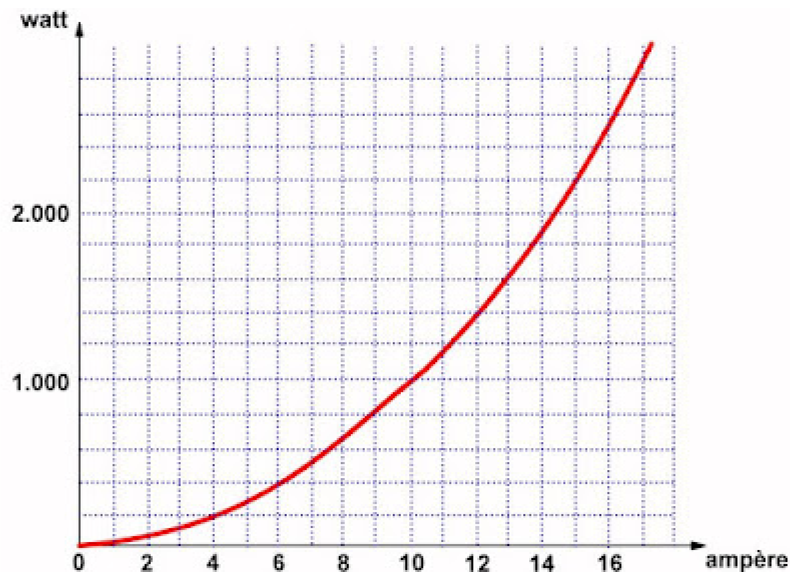
Elektrische weerstanden worden warm als er een stroom doorheen loopt. Dat is logisch, want de elektronen van de stroom botsen op atomen in de weerstand. Hierdoor worden deze atomen in trilling gebracht waardoor onderlinge wrijvingen ontstaan. Wrijving uit zich steeds onder de vorm van warmte-ontwikkeling. Het verschijnsel dat elektrische stroom warmte opwekt staat bekend als het Joule-effect.

De formule voor elektrisch vermogen

Er bestaat een eenvoudig wiskundig verband dat het elektrisch vermogen uitdrukt dat door een elektrische stroom in een geleider wordt opgewekt:
$P = U \cdot I$
Het vermogen is gelijk aan het product van de spanning over de geleider en de stroom door de geleider. Dat vermogen wordt in watt uitgedrukt, afgekort tot W. Een stroom van 1 A, die vloeit als gevolg van een spanning van 1 V, wekt dus een vermogen van 1 W op. Uit de wet van Ohm volgt echter dat spanning gelijk is aan het product van stroom en weerstand:
$U = I \cdot R$
Als u deze uitdrukking invult in de formule van het vermogen ontstaat:
$P = I^2 \cdot R$
Het vermogen is gelijk aan het kwadraat van de stroom die door een weerstand vloeit, vermenigvuldigd met de weerstand. Beide formules zijn zeer bruikbaar in de elektronica om het vermogen te berekenen dat in een weerstand of een halfgeleider wordt gedissipeerd.

Verband tussen het vermogen en de stroom

Tussen het opgenomen vermogen in een belasting en de door de belasting vloeiende stroom bestaat geen lineair verband, maar een kwadratisch verband. In onderstaande figuur is dit verband grafisch uitgedrukt voor een bepaalde, constante weerstand.



Het verband tussen vermogen en stroom, bij gelijkblijvende weerstand.
(© 2017 Jos Verstraten)

De werkingsgraad
Sommige apparaten nemen elektrisch vermogen op, maar geven ook weer nuttig elektrisch vermogen af. Een typisch voorbeeld is een transformator, waar primair een hoeveelheid vermogen wordt ingestopt en secundair een hoeveelheid vermogen wordt afgetapt. Nu zou het prachtig zijn als u even veel vermogen uit een trafo kon halen als u er had ingestopt. Maar zo zit de wereld niet in elkaar! Er treden steeds verliezen op, in dit geval bijvoorbeeld onder de vorm van warmtevermogen, dat in de windingen en in de kern wordt gedissipeerd. Uit een trafo kunt u dus minder elektrisch vermogen halen dan er wordt ingestopt. Dit verschijnsel wordt uitgedrukt onder de vorm van een nieuwe grootheid, de werkingsgraad. Deze grootheid wordt voorgesteld door alweer een Griekse letter, deze keer de η, uitgesproken als 'eta'. De definitie van η:
$\eta = P_{uit} / P_{in}$
De werkingsgraad is dus gelijk aan de verhouding tussen het vermogen dat uit een apparaat wordt gehaald en het vermogen dat u er hebt ingestopt. Uit de aard der zaak is η altijd een getal dat kleiner is dan een. Zou η groter zijn dan een, dan zou u een soort perpetuum mobile hebben gemaakt, een apparaat dat meer vermogen levert dan u er in stopt! Normale voedingstransformatoren hebben een werkingsgraad van rond 0,90. Gloeilampen zijn wat dat betreft verkwistend, want de werkingsgraad ligt rond 0,015.

Elektrische energie

Definitie
Een begrip dat onlosmakelijk met vermogen verbonden is, is energie. Het vermogen is immers de energie of de arbeid die per tijdseenheid geleverd wordt. Hieruit volgt dat de energie gelijk is aan het vermogen, vermenigvuldigd met de tijd dat dit vermogen gedissipeerd wordt:
$W = P \cdot t$
Als een stroom door een weerstand vloeit, wordt een hoeveelheid energie verbruikt. Het is deze energie die u aan het energiebedrijf moet betalen. Uit de formule volgt dat elektrische energie wordt uitgedrukt in Ws, wattseconde. Dat is echter een heel onpraktische eenheid, vandaar dat meestal gewerkt wordt met kWh, kilowattuur. De omrekeningsfactor is natuurlijk gemakkelijk te achterhalen:
1 kWh = 3.600.000 Ws

Voorbeeld
Stel dat uw flatscreen 150 W vermogen verbruikt en dat dit apparaat gemiddeld vier uur per

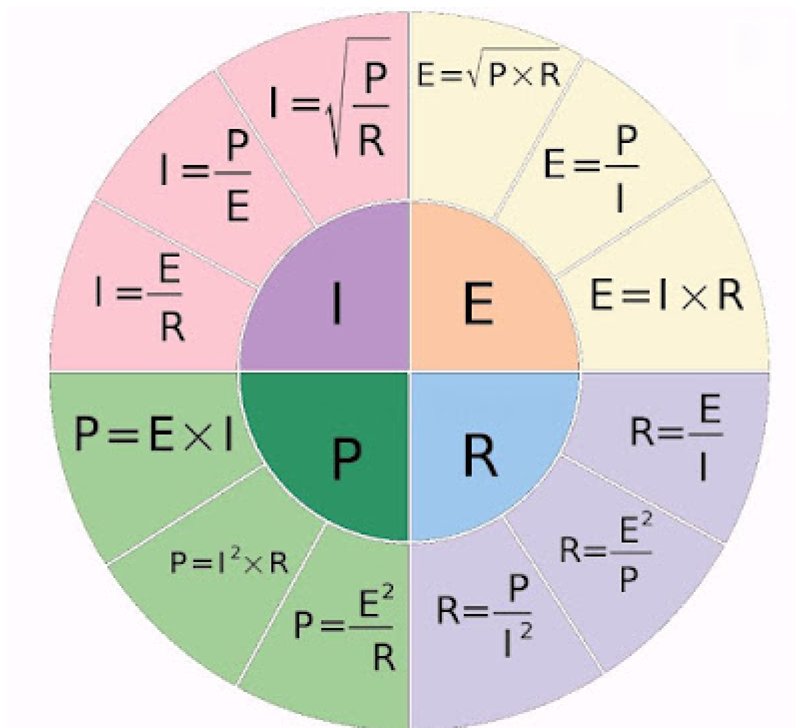
dag in gebruik is. Hoeveel energie wordt er dan per jaar verbruikt?
W = 150 W • 365 dagen • 4 uur
W = 219.000 Wh
W = 219 kWh
Als u de prijs weet die u per kWh moet betalen, kunt u berekenen hoeveel die flatscreen per jaar aan energie kost. Stel dat u € 0,19 betaalt per kWh, dan kost die mooie flatscreen u per jaar:
Prijs = 219 kWh • 0,19 €/kWh = € 41,61

Verband tussen spanning, stroom, weerstand en vermogen

Tussen de vier tot nu toe besproken elektrische grootheden:

- Spanning
- Stroom
- Weerstand
- Vermogen

bestaan simpele wiskundige verbanden, die op de onderstaande manier prachtig in beeld worden gebracht. Omdat deze illustratie afkomstig is van een Amerikaanse site, wordt de spanning voorgesteld door het symbool E en niet door U. Maar wij vinden deze cirkel zo mooi dat wij hem u niet wilden onthouden.



Het verband tussen spanning, stroom, weerstand en vermogen schitterend in beeld gebracht. (© Matt Rider via Wikimedia Commons)